



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND

12 **Offenlegungsschrift**
10 **DE 198 19 445 A 1**

51 Int. Cl.⁶:
F 02 D 41/14



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

Patent- und
KLEIN, PINTER
& LAMINGER OEG
Prinz Eugen-Straße 70
A-1040 Wien

21 Aktenzeichen: 198 19 445.5
22 Anmeldetag: 30. 4. 98
43 Offenlegungstag: 4. 11. 99

71 Anmelder:
Volkswagen AG, 38440 Wolfsburg, DE

72 Erfinder:
Waschatz, Uwe, Dr., 38527 Meine, DE; Heinrich,
Axel, Dr., 38527 Meine, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

DE 195 27 112 C1
DE 195 14 423 A1
DE 44 34 455 A1
DE 44 28 818 A1
DE 43 04 441 A1
DE 40 07 548 A1
DE 34 08 223 A1
EP 05 24 575 A2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Verfahren zur Bestimmung von Kennfelddaten zur Kennfeldsteuerung eines Verbrennungsmotors sowie
Verfahren zur Steuerung eines Verbrennungsmotors

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung
von Kennfelddaten bzw. zur Bestimmung von einem oder
mehreren Parametern für eine oder mehrere mathemati-
sche Funktionen zur Steuerung eines Verbrennungsmo-
tors. Die Idee besteht darin, nicht mehr jeden für das Mo-
torsteuern benötigten Meßwert durch Einstellung
der entsprechenden Einflußfaktoren am Motor auf dem
Antriebsprüfstand einzeln zu erfassen und aufzunehmen,
sondern aus einer deutlich geringeren Anzahl aufgenom-
mener Meßwerte mittels numerischer, insbesondere sta-
tistischer Auswerte- und Berechnungsverfahren die übrigen
Werte zu bestimmen. Es wird dadurch eine ganz be-
trächtliche Verringerung der Anzahl der benötigten Meß-
werte und damit eine ganz beträchtliche Verkürzung der
benötigten Prüfstandsmeßzeit erreicht.

Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren sowie ein
elektronisches Motorsteuergerät zur Steuerung eines Ver-
brennungsmotors. Die grundlegende Idee besteht darin,
nicht mehr jeden einzelnen Kennfeldmeßwert im Motor-
steuergerät abzuspeichern, sondern dort lediglich die Pa-
rameter mathematischer Funktionen, die die Abhängig-
keit verschiedener Zielgrößen von unterschiedlichen Ein-
flußfaktoren anhand der Parameter beschreiben, abzule-
gen. Es ergibt sich eine beträchtliche Einsparung an benö-
tigter Speicherkapazität des Motorsteuergerätes.

Experimentell

kontrollierbare

Einflußfaktoren:

- Einspritzdüsenbeurform DB
- Kraftstoffdruck FP
- Einspritzbeginn SB
- Abgasrückföhrate AGR

.....

Nicht

kontrollierbare

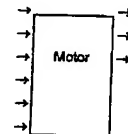
Einflußfaktoren:

- Lufttemperatur vor
dem Einlaßventil TL
- Temperatur des
Köhlwassers TW

.....

Zielgrößen Z:

- Kraftstoffverbrauch KRSTD
- Stickoxidemission NOx
- Rußemission RUSSZ
- Kohlenwasserstoffemission KW
- Motorvibrationen VIB



Modelgleichung (quadratischer Polynom-Ansatz):

$$Z_i = a_0 + a_{11} \cdot DB + a_{12} \cdot FP + a_{13} \cdot SB + \dots + a_{111} \cdot DB^2 + a_{112} \cdot FP^2 + a_{113} \cdot SB^2 + \dots + a_{1112} \cdot DB \cdot FP + a_{1113} \cdot DB \cdot SB + \dots + a_{1123} \cdot FP \cdot SB + a_{123} \cdot FP \cdot SB + \dots + a_{1234} \cdot SB \cdot AGR + \dots$$

Jedes a_i erfordert mindestens einen Meßwert.

DE 198 19 445 A 1

DE 198 19 445 A 1

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung von Kennfelddaten zur Kennfeldsteuerung eines Verbrennungsmotors nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 ein Verfahren zur Bestimmung von einem oder mehreren Parametern für eine oder mehrere mathematische Funktionen zur Steuerung eines Verbrennungsmotors nach dem Oberbegriff des Anspruchs 2, ein Verfahren zur Steuerung eines Verbrennungsmotors nach dem Oberbegriff des Anspruchs 3 sowie ein elektronisches Motorsteuergerät zur Steuerung eines Verbrennungsmotors nach dem Oberbegriff des Anspruchs 4.

Es sind Verfahren und Vorrichtungen in Gestalt elektronischer Motorsteuergeräte zur Steuerung von Verbrennungsmotoren bekannt, bei denen mittels Sensoren ein oder mehrere Einflußfaktoren, die den Betrieb des Verbrennungsmotors beeinflussen, gemessen und über Eingangskanäle dem Motorsteuergerät zugeführt werden. Das Motorsteuergerät verfügt über mindestens eine Speichereinheit, in der in Gestalt eines sogenannten Kennfeldes für eine Vielzahl möglicher Werte dieser Einflußfaktoren Ausgangswerte für eine oder mehrere Zielgrößen gespeichert sind. Eine Rechen- und Datenverarbeitungseinheit in dem elektronischen Motorsteuergerät wählt aus den in der Speichereinheit gespeicherten Werten des Kennfeldes diejenigen Ausgangswerte aus, die den gemeldeten Werten der Einflußfaktoren zugeordnet sind. Diese Ausgangswerte für Zielgrößen werden von der Rechen- und Datenverarbeitungseinheit über einen oder mehrere Ausgangskanäle ausgegeben und beeinflussen den Arbeitszustand des zu steuernden Verbrennungsmotors.

Einflußfaktoren dieser geschilderten sog. kennfeldgesteuerten elektronischen Motorsteuergeräte sind z. B. Drehzahl, Lambda-Wert, Last, Lufttemperatur, Kühlwassertemperatur oder Öltemperatur. Zielgrößen sind in modernen elektronischen Motorsteuergeräten im allgemeinen das Drehmoment, die Katalysatortemperatur sowie die Abgastemperatur.

Moderne elektronische Motorsteuergeräte enthalten oftmals nicht nur ein Kennfeld, sondern mehrere Kennfelder, die beispielsweise je nach gewünschter Fahrweise oder Umgebungsbedingungen ausgewählt werden. Z. B. kann im Steuerprogramm des Motorsteuergerätes vorgesehen sein, daß während der Warmlaufphase des Motors ein Kennfeld A benutzt wird, während in der normalen Betriebsphase des Motors ein anderes Kennfeld B benutzt wird. Außerdem werden bei modernen elektronischen Motorsteuergeräten im Bemühen um weitere Verbesserungen bei Kraftstoffverbrauch, Lauf- und Schadstoffemission immer mehr Einflußfaktoren erfaßt und für die Bestimmung des jeweiligen Kennfeld-Ausgangswertes herangezogen, so daß die in der bzw. den Speichereinheiten moderner elektronischer Motorsteuergeräte abzuspeichernden Kennfeldwerte ständig zunehmen. Die großen Kennfelder bedingen eine entsprechend hohe Speicherkapazität in den elektronischen Motorsteuergeräten. Da elektronische Motorsteuergeräte im Vergleich zu stationären elektronischen Speicher- und Recheneinheiten in rauen Umgebungsbedingungen, nämlich unter enormer Temperatur-, Schwingungs- und Stoßbelastung arbeiten und bei ihnen über Jahre hinweg ein störungsfreier Betrieb gewährleistet sein muß, sind die verwendeten Speichereinheiten der elektronischen Motorsteuergeräte im Vergleich zu sonstigen elektronischen Speichereinheiten sehr kostspielig. Durch die hohen Anforderungen an die Speicherkapazität werden die elektronischen Motorsteuergeräte daher stark verteuert.

Es ist bereits ansatzweise versucht worden, die üblicherweise erforderliche große Speicherkapazität für die Speichereinheiten der elektronischen Motorsteuergeräte zu reduzieren. Die DE-OS 195 14 423 schlägt dazu ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erfassung des in einen Zylinder eines Verbrennungsmotors geführten Luftstromes vor, die so gestaltet sind, daß sie die Anzahl der Umdrehungen des Motors ermitteln, den Druck eines Ansaugrohrs eines Motors ermitteln und den in einen Zylinder des Motors geführten Luftstrom Q_c berechnen, und zwar auf der Basis der Anzahl der Umdrehungen und des Druckes des Ansaugrohrs gemäß einem linearen Ausdruck $Q_c = \alpha \cdot P + \beta$. Das Speichervolumen des benötigten Datenspeichers zur Speicherung der auf die Unterdruckwerte und die Motordrehzahlwerte bezogenen Korrekturen des volumetrischen Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors wird dadurch im Vergleich zu demjenigen des ansonsten benötigten zweidimensionalen Kennfeldes verringert.

Jeder im Motorsteuerkennfeld eines elektronischen Motorsteuergerätes gespeicherte Wert wird zuvor experimentell in Testläufen an einem Testmotor auf einem Antriebsprüfstand gemessen. Moderne elektrische Motorsteuergeräte besitzen mehrdimensionale Kennfelder mit insgesamt tausenden oder zehntausenden verschiedener Werte, so daß sich für jeden zu vermessenden Motor-Getriebe-Typ entsprechend lange Meßzeiten auf einem Antriebsprüfstand zur Erfassung der Kennfelderstellung benötigten Meßwerte ergeben. Bei manuellem Prüfstandbetrieb betragen die Prüfstandzeiten üblicherweise Wochen bis Monate, und das für jeden einzelnen Motor-Getriebe-Typ.

Aus den Artikeln "Automatische Motormanagement-Abstimmung" von Franz Thomas Kampelmühler, erschienen in ATZ/MTZ Sonderheft Motor und Umwelt 1992, und "Verkürzung der Entwicklungszeiten für moderne Antriebe durch VEGA" von Jürgen Bredenbeck, Gerald Fehl und Hans-Peter Dohmen, erschienen in ATZ/MTZ Sonderausgabe System Partners 1997, sind Optimierungsstrategien für einen weitgehend automatisierten Meßablauf für Antriebsprüfstände zur Ermittlung der Kennfeldparameter bekannt. Diese optimierten Meßkonzepte erreichen durch ihre weitgehende Automatisierung zwar eine beträchtliche Verkürzung der Meßzeiten sowie eine deutliche Verringerung des Personalaufwandes; das Problem einer Vielzahl zu erfassender Meßwerte, die bis zu mehreren tausend oder zehntausend Meßwerten gehen können, wird dadurch aber nicht beseitigt. Besonders deutlich wird dies in dem letztgenannten Artikel von Jürgen Bredenbeck, Gerald Fehl und Hans-Peter Dohmen, die bei einem Einsatz ihres automatisierten VEGA-Verfahrens zwar eine Reduktion des benötigten Personalaufwandes gegenüber einer rein manuellen Prüfstandeinstellung und -erfassung der Meßwerte von 97% angeben; die benötigte Prüfstandslaufzeit reduziert sich allerdings im Vergleich dazu nur um 43%, so daß weiterhin eine beträchtliche Prüfstandslaufzeit notwendig bleibt.

Es besteht die Aufgabe, ein Verfahren zur Bestimmung von Kennfelddaten zur Kennfeldsteuerung eines Verbrennungsmotors sowie ein Verfahren zur Bestimmung von einem oder mehreren Parametern für eine oder mehrere mathematische Funktionen zur Steuerung eines Verbrennungsmotors derart zu verbessern, daß die bisher benötigten langen Meßzeiten auf Antriebsprüfständen reduziert werden. Es besteht weiterhin die Aufgabe, ein Verfahren zur Steuerung eines Verbrennungsmotors sowie ein elektronisches Motorsteuergerät zur Steuerung eines Verbrennungsmotors derart zu verbessern, daß die für das Verfahren benötigte Speicherkapazität bzw. die Speicherkapazität der Speichereinheit des elektronischen Motorsteuergerätes verringert werden kann.

Die erstgenannte Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 2 gelöst. Die grundlegende Idee besteht darin, nicht mehr jeden für das Motorsteuerkennfeld benötigten Zielgrößen-Meßwert durch Einstellung der entsprechenden Einflußfaktoren des Motors auf dem Antriebsprüfstand einzeln zu erfassen und aufzunehmen, sondern aus einer deutlich geringeren Anzahl aufgenommenen Meßwerte mittels an sich bekannter numerischer, insbesondere statistischer Auswerte- und Berechnungsverfahren die übrigen Werte zu bestimmen. Es wird dadurch eine ganz beträchtliche Verringerung der Anzahl der benötigten Meßwerte und damit eine ganz beträchtliche Verkürzung der benötigten Prüfstands-Meßzeit erreicht. Insbesondere in Verbindung mit den oben genannten, an sich bekannten Automatisierungsverfahren zur eigentlichen Kennfeldwertmessung kann dann nicht nur der benötigte Personalaufwand, sondern die gesamte zur Messung auf dem Antriebsprüfstand benötigte Zeit beträchtlich verkürzt werden.

Die Bedeutung der erfindungsgemäßen Lösung mit den Merkmalen des Verfahrens gemäß Anspruch 1 bzw. 2 soll anhand eines konkreten Zahlenbeispiels kurz dargestellt werden. Enthält ein Motorsteuergerät insgesamt 5 Motorsteuerkennfelder für 5 verschiedene Betriebszustände des Antriebs, und werden (bei 3 Zielgrößen) in jedem dieser 5 Steuerkennfelder 9 Einflußfaktoren mit jeweils 100 Meßpunkten berücksichtigt, so enthält das Motorsteuergerät insgesamt $5 \cdot (9 + 3) \cdot 100 = 6000$ Kennwerte. Das bedeutet, daß zur Ermittlung dieser 6000 Kennwerte entsprechend mindestens 6000 Meßwerte an $5 \cdot 9 \cdot 100 = 4500$ Arbeitspunkten auf einem Antriebsprüfstand aufgenommen werden müssen. Durch die erfindungsgemäße Lösung gemäß Anspruch 1 bzw. Anspruch 2 sei es nun beispielsweise möglich, für jeden der 9 Einflußfaktoren mit 3 Meßwerten pro Einflußfaktor zur Bestimmung der jeweiligen Parameter der jeweiligen mathematischen Funktion für jede der 3 Zielgrößen auszukommen. Dann müssen entsprechend lediglich $5 \cdot (9 + 3) \cdot 3 = 180$ Meßwerte an $5 \cdot 9 \cdot 3 = 135$ Arbeitspunkten auf dem Antriebsprüfstand aufgenommen werden. Die Ersparnis an Meßaufwand und -zeit ist ersichtlich beträchtlich.

Die zweitgenannte Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 3 sowie durch ein elektronisches Motorsteuergerät mit den Merkmalen des Anspruchs 4 gelöst. Die grundlegende Idee besteht darin, nicht mehr jeden einzelnen Kennfeldmeßwert im elektronischen Motorsteuergerät abzuspeichern, sondern dort lediglich die Parameter der mathematischen Funktionen, die die Abhängigkeit der verschiedenen Zielgrößen von den Einflußfaktoren anhand der Parameter beschreiben, abzulegen. Die Einsparung an benötigter Speicherkapazität des Motorsteuergerätes ist, wie insbesondere anhand des Ausführungsbeispiels deutlich werden wird, beträchtlich. Auf diese Weise kann eine deutliche Verbilligung des Motorsteuergerätes erreicht werden.

Das Verfahren zur Steuerung eines Verbrennungsmotors gemäß Anspruch 3 bzw. das elektronische Motorsteuergerät zur Steuerung eines Verbrennungsmotors gemäß Anspruch 4 sehen vor, daß statt des Auslesens eines in einer Look-up-Kennfeldwerttabelle gespeicherten Kennfeldwertes in Abhängigkeit von mindestens einem Eingangswert statt dessen der bzw. die Ausgangswerte zur Steuerung des Verbrennungsmotors anhand der im Motorsteuergerät gespeicherten Funktion(en) in Abhängigkeit von mindestens einem Eingangswert jeweils berechnet werden. Die dafür im Steuergerät benötigte Rechen- und Datenverarbeitungskapazität steht bei modernen elektronischen Motorsteuergeräten ohnehin zur Verfügung, da auch bei diesen ständig diverse Rechenoperationen notwendig sind. Beispielsweise kann in einem konventionell gestalteten Kennfeld selbst bei einer hohen Anzahl von Kennfeldwerten nicht für genau jeden gemeldeten, einen Einflußfaktor repräsentierenden Eingangswert ein entsprechender Kennfeldtabelleneintrag vorhanden sein. Dazwischenliegende Werte werden üblicherweise durch Interpolation zwischen gespeicherten Kennfeldtabellenwerten berechnet. Die bei der erfinderischen Lösung gemäß Anspruch 3 oder 4 im Motorsteuergerät notwendigen Rechenoperationen zur Berechnung des Zielgrößen-Funktionswertes anhand der im Motorsteuergerät gespeicherten Funktionen-Parameter für die Einflußfaktoren sind nicht aufwendiger als die bekannten Interpolationsrechnungen im Stand der Technik.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand von Unteransprüchen.

Die Erfindung wird im folgenden modellhaft anhand eines einfachen Ausführungsbeispiels dargestellt, wobei das Ausführungsbeispiel anhand der folgenden beigefügten Abbildungen näher erläutert wird:

Abb. 1: Einfluß der Arbeitspunkte auf die Modellbildung;

Abb. 2: Abhängigkeiten der Ruß- und Stickoxidemissionen RUSSZ bzw. NOx von Einspritzbeginn SB, Ladedruck PL und Lufttemperatur im Saugrohr TL;

Abb. 3: Resultat unterschiedlicher Modellansätze für das Stickoxidemissions-Modell bei Berücksichtigung von 21 Funktionstermen;

Abb. 4: Wirkung der Haupteinflußfaktoren auf die Stickoxidemissionen NOx, mit 95% Vertrauensintervall;

Abb. 5: Einfluß der Modellfunktionsterme auf die Stickoxidemission NOx;

Abb. 6: Stickoxidemission NOx in Abhängigkeit vom Kraftstoffeinspritzbeginn SB und Ladedruck PL, mit 95% Vertrauensintervall;

Abb. 7: berechnetes Kennfeld für den Kraftstoffdurchsatz KRSTDS, die Stickoxid- und die Rußemissionen NOx bzw. RUSSZ in Abhängigkeit vom Ladedruck PL und Einspritzbeginn SB;

Abb. 8: zusammenfassende schematische Darstellung des Prinzips der erfinderischen Lösung einer beschleunigten Kennfeldwert- und Parameterwertermittlung.

Im folgenden wird nunmehr ein Versuchsablauf zur Bestimmung von mehreren Parametern mathematischer Funktionen bzw. zur Bestimmung von Kennfelddaten für einen Diesel-Verbrennungsmotor geschildert. Der Dieselmotor ist mit direkter Kraftstoffeinspritzung und einem Abgasturbolader mit Ladeluftkühler und variabler Turbinengeometrie und daher variablem mittlerem Ladedruck PL ausgerüstet. Die Versuchsmessungen laufen auf einem an sich bekannten Antriebsprüfstand ab.

Die Messungen sind zur Beantwortung der Frage geplant, wie sich die experimentell kontrollierbaren Einflußfaktoren Abgasrückführtrate AGR, mittlerer Ladedruck PL und Kraftstoffeinspritzbeginn SB auf die Zielgrößen Kraftstoffverbrauch (Kraftstoffdurchsatz) KRSTDS, Rußemissionen (Rußzahl) RUSSZ und Stickoxidemissionen NOx auswirken. Zur Vereinfachung der Versuchsbedingungen sollen die Motordrehzahl DRZ bei konstant $DRZ = 2000 \text{ min}^{-1}$, der Ladedruck PL bei konstant $PL = 2 \text{ bar}$ sowie das Drehmoment MD bei konstant $MD = 30 \text{ Nm}$ gehalten werden. Zusätzlich wird als weiterer, experimentell nicht kontrollierbarer Einflußfaktor die Lufttemperatur im Saugrohr vor dem Einlaßven-

DE 198 19 445 A 1

til TL gemessen. Darüber hinaus wird außerdem die Lufttemperatur am Ausgang des Ladeluftkühlers TLAD als vielleicht mögliche weitere, experimentell nicht kontrollierbare Einflußgröße mit erfaßt.

Vor Versuchsbeginn wird festgelegt, daß für die kontrollierbaren Einflußfaktoren im Versuch folgende Werte eingestellt werden sollen, die sich aus der nachfolgenden Tabelle 1 ergeben.

Tabelle 1

Liste der vor Versuchsbeginn im Modellansatz berücksichtigten Einflußfaktoren

Faktor	Abkürzung	Werte	Einheit
Kraftstoffeinspritzbeginn	SB	-15, -13, -11, -9, -7, -5, -3	Kurbelwinkelgrade (°KW) vor oberem Totpunkt
mittlerer Ladedruck	PL	1050, 1080, 1120, 1150	mbar
Stellsignal für Abgasrückführungsventil	AGR	keine, gering, mittel, viel, maximal	
Lufttemperatur vor dem Einflußventil	TL	unkontrolliert	°C

Es sollen somit für den Kraftstoffeinspritzbeginn SB 7 mögliche Werte, für den mittleren Ladedruck PL 4 mögliche Werte und für das Stellsignal des Abgasrückführungsventils 5 mögliche Stufen eingestellt werden. Es konnte vor dem Versuch keine klare Auskunft darüber gegeben werden, wie das Stellsignal für das Abgasrückführungsventil einzustellen ist, um eine definierte Abgasrückführungsrate AGR zu erhalten. Aus diesem Grunde wurden zunächst die qualitativen Angaben "keine, gering, mittel, viel, maximal" gewählt. Während der Messungen wurde für jedes der 5 möglichen Stellsignale für das Abgasrückführungsventil die sich experimentell ergebende Abgasrückführungsrate AGR gemessen, so daß nach Abschluß der Messungen den qualitativen Angaben für das Stellsignal des Abgasrückführungsventils eine quantitative Abgasrückführungsrate AGR zugeordnet werden konnte. Diese quantitative Abgasrückführungsrate AGR wird anschließend der Auswertung der Messungen zugrundegelegt. Diese Vorgehensweise ist möglich, sie erhöht lediglich den erforderlichen Meßaufwand, da nun bei der Festlegung der Arbeitspunkte im Arbeitsplan für die Messungen alle 5 möglichen Stufen des Stellsignals des Abgasrückführungsventils berücksichtigt werden müssen, um entsprechende quantitative Abgasrückführungsrate AGR zu gewinnen.

Wie bereits vor Versuchsbeginn vermutet wurde, hat die Temperatur der Luft im Saugrohr vor dem Einlaßventil TL tatsächlich – wie sich dann zeigte – einen nicht vernachlässigbaren Einfluß auf die Zielgrößen. Da sie andererseits aber im Versuch nicht exakt vorgegeben werden kann, wird sie bereits vor Versuchsbeginn im Modellansatz als Einflußfaktor berücksichtigt, der aber nicht experimentell kontrollierbar ist. Auf diese Weise werden die Temperatureinflüsse TL in den Modellansatz für den Versuchsmotor mit einbezogen.

Die 3 experimentell kontrollierbaren Einflußfaktoren Kraftstoffeinspritzbeginn SB, Ladedruck PL und Abgasrückführungsrate AGR erzeugen einen Wertebereich mit 3 Dimensionen und $7 \cdot 4 \cdot 5 = 140$ Wertepunkten. Beim bekannten Stand der Technik hätten alle diese 140 Wertepunkte einzeln als Arbeitspunkte auf dem Antriebsprüfstand angefahren und durchgemessen werden müssen. Statt dessen gilt es erfindungsgemäß, aus diesen 140 möglichen Wertepunkten wesentliche Punkte als Arbeitspunkte für die Messungen auf dem Antriebsprüfstand auszuwählen.

Grundsätzlich gilt, daß bei dieser Auswahl der Arbeitspunkte die verschiedenen möglichen Werte der verschiedenen Einflußfaktoren möglichst gleichmäßig berücksichtigt werden sollten, um eine im wesentlichen gleichmäßige Verteilung der Arbeitspunkte im Wertebereich zu erreichen. Eine übermäßige Massierung von Arbeitspunkten in einem bestimmten Gebiet des zur Verfügung stehenden Wertebereichs fördert Fehler und Ungenauigkeiten bei der statistischen Auswertung der erhaltenen Meßdaten an den Arbeitspunkten. Außerdem gilt, daß man Extremwerte, d. h. möglichst kleine und möglichst große Werte der Einflußfaktoren, bevorzugt in die Messungen mit einbeziehen wird, da bekanntermaßen Interpolationsverfahren zwischen zwei Wertepunkten üblicherweise mit geringeren numerischen Fehlern und Streuungen behaftet sind als Extrapolationsverfahren.

Die Auswahl von Wertepunkten als Arbeitspunkte für die durchzuführenden Messungen kann unter Berücksichtigung dieser Maximen von Hand geschehen, sie kann aber auch einer universellen Meßplanungs-, Datenanalyse und -auswertungssoftware überlassen werden. Im Ausführungsbeispiel kamen dazu die kommerziell erhältlichen, universellen Meßplanungs-, Datenanalyse und -auswertungssoftwarewerkzeuge RS/1 Discover und RS/1 Explore zum Einsatz.

Als unabdingbare Voraussetzung bei der Auswahl der Arbeitspunkte muß lediglich berücksichtigt werden, daß die Anzahl der aufzunehmenden Meßwerte mindestens gleich der maximalen Anzahl der in einer verwendeten Zielgrößenfunktion vorkommenden Parameter ist. Für die drei Zielgrößen Kraftstoffverbrauch KRSTDS, Rußemission RUSSZ und Stickoxidemission NOx wurde als mathematischer Modellansatz jeweils ein quadratisches Polynom gewählt. Bei 4 Variablen (nämlich den 3 kontrollierbaren Einflußfaktoren Abgasrückführung AGR, Ladedruck PL und Kraftstoffeinspritzbeginn SB sowie dem nicht kontrollierbaren Einflußfaktor Lufttemperatur vor dem Einlaßventil TL) bedeutet dies unter Berücksichtigung der linearen und quadratischen Terme sowie aller einfachen Produkte ein Modell mit 15 Funktionstermen entsprechend der Tabelle 2.

Tabelle 2

Die 15 Modellterme

1	SB	PL	AGR	TL	SB*PL	SB*AGR	SB*TL	PL*TL	PL*AGR	AGR*TL
SB ²	PL ²	AGR ²	TL ²							

5

Die der Auswertung der Ergebnisse gemäß vorangehender Versuchsplanung zugrundeliegende Formel lautet somit für die Stickoxidemissionen NO_x:

10

$$\begin{aligned} \text{NO}_x = & a_0 + a_{\text{SB}} \cdot \text{SB} + a_{\text{PL}} \cdot \text{PL} + a_{\text{AGR}} \cdot \text{AGR} + a_{\text{TL}} \cdot \text{TL} + a_{\text{SB} \cdot \text{PL}} \cdot \text{SB} \cdot \text{PL} \\ & + a_{\text{SB} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{SB} \cdot \text{AGR} + a_{\text{PL} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{PL} \cdot \text{AGR} + a_{\text{TL} \cdot \text{SB}} \cdot \text{TL} \cdot \text{SB} \\ & + a_{\text{TL} \cdot \text{PL}} \cdot \text{TL} \cdot \text{PL} + a_{\text{TL} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{TL} \cdot \text{AGR} + a_{\text{SB}^2} \cdot \text{SB}^2 + a_{\text{PL}^2} \cdot \text{PL}^2 \\ & + a_{\text{AGR}^2} \cdot \text{AGR}^2 + a_{\text{TL}^2} \cdot \text{TL}^2; \end{aligned}$$

15

für die Russemissionen (Russzahl) RUSSZ:

$$\begin{aligned} \text{RUSSZ} = & b_0 + b_{\text{SB}} \cdot \text{SB} + b_{\text{PL}} \cdot \text{PL} + b_{\text{AGR}} \cdot \text{AGR} + b_{\text{TL}} \cdot \text{TL} + b_{\text{SB} \cdot \text{PL}} \cdot \text{SB} \cdot \text{PL} \\ & + b_{\text{SB} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{SB} \cdot \text{AGR} + b_{\text{PL} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{PL} \cdot \text{AGR} + b_{\text{TL} \cdot \text{SB}} \cdot \text{TL} \cdot \text{SB} \\ & + b_{\text{TL} \cdot \text{PL}} \cdot \text{TL} \cdot \text{PL} + b_{\text{TL} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{TL} \cdot \text{AGR} + b_{\text{SB}^2} \cdot \text{SB}^2 + b_{\text{PL}^2} \cdot \text{PL}^2 \\ & + b_{\text{AGR}^2} \cdot \text{AGR}^2 + b_{\text{TL}^2} \cdot \text{TL}^2 \end{aligned}$$

20

und für den Kraftstoffverbrauch (Kraftstoffdurchsatz) KRSTDS:

25

$$\begin{aligned} \text{KRSTDS} = & c_0 + c_{\text{SB}} \cdot \text{SB} + c_{\text{PL}} \cdot \text{PL} + c_{\text{AGR}} \cdot \text{AGR} + c_{\text{TL}} \cdot \text{TL} + c_{\text{SB} \cdot \text{PL}} \cdot \text{SB} \cdot \text{PL} \\ & + c_{\text{SB} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{SB} \cdot \text{AGR} + c_{\text{PL} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{PL} \cdot \text{AGR} + c_{\text{TL} \cdot \text{SB}} \cdot \text{TL} \cdot \text{SB} \\ & + c_{\text{TL} \cdot \text{PL}} \cdot \text{TL} \cdot \text{PL} + c_{\text{TL} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{TL} \cdot \text{AGR} + c_{\text{SB}^2} \cdot \text{SB}^2 + c_{\text{PL}^2} \cdot \text{PL}^2 \\ & + c_{\text{AGR}^2} \cdot \text{AGR}^2 + c_{\text{TL}^2} \cdot \text{TL}^2. \end{aligned}$$

30

Da gemäß Modellansatz jede der drei zu bestimmenden Zielgrößenfunktionen jeweils 15 Parameter enthält, die drei Zielgrößen Kraftstoffverbrauch KRSTDS, Rußemission RUSSZ und Stickoxidemission NO_x aber gemäß Modellansatz als voneinander unabhängig angenommen sind, genügen grundsätzlich 15 Arbeitspunkte zur Bestimmung der $3 \cdot 15 = 45$ Parameter a_x , b_x und c_x , sofern an jedem der 15 Arbeitspunkte jeweils Meßwerte für alle vier oben angegebenen Einflußfaktoren sowie Meßwerte für alle drei Zielgrößen (also insgesamt $15 \cdot [4 + 3] = 105$ Meßwerte) gemessen werden. Die 45 Parameter a_x , b_x und c_x könnten dann mittels an sich bekannter numerischer Methoden der Linearen Algebra (Auflösung eines linearen Gleichungssystems) aus den Meßwerten bestimmt werden.

35

Wegen der zunächst lediglich qualitativen Vorgabe der Einstellwerte für das Abgasrückführungsventil müssen aber für die Abgasrückführungsrate AGR alle 5 möglichen Einstellstufen berücksichtigt werden. Außerdem ist es wünschenswert, mehr Arbeitspunkte als zur Berechnung der Parameter unbedingt notwendig festzulegen, um auf diese Weise bei der Auswertung der Meßergebnisse statistische Ausgleichsverfahren anwenden zu können und so die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Es wird daher für die Messungen ein Arbeitsplan mit 23 Arbeitspunkten gemäß folgender Tabelle 3 festgelegt.

40

45

50

55

60

65

DE 198 19 445 A 1

Tabelle 3

Arbeitsplan für Motordrehzahl DRZ = 2000 min⁻¹ und Ladedruck PL = 2 bar

Arbeitspunkt	Einspritzbeginn SB	Ladedruck PL	AGR-Rate AGR
Nr.	°KW	mbar	
1	-15	1150	viel
2	-15	1050	keine
3	-15	1050	mittel
4	-3	1050	mittel
5	-3	1080	gering
6	-15	1150	keine
7	-3	1120	maximal
8	-3	1050	viel
9	-3	1050	maximal
10	-15	1150	mittel
11	-3	1150	viel
12	-3	1150	mittel
13	-15	1050	gering
14	-9	1080	viel
15	-15	1150	maximal
16	-3	1150	gering
17	-15	1050	viel
18	-15	1150	gering
19	-7	1150	maximal
20	-3	1150	keine
21	-15	1050	maximal
22	-7	1050	gering
23	-3	1050	keine

Anschließend werden gemäß des Arbeitsplanes die verschiedenen Einstellwerte gemäß den 23 Arbeitspunkten für die kontrollierbaren Einflußfaktoren in an sich bekannter Weise am Antriebsprüfstand eingestellt. Die tatsächlich am Prüfstand eingestellten und gemessenen Werte der kontrollierbaren und nicht kontrollierbaren Einflußfaktoren sind in der Tabelle 4 zusammengefaßt.

DE 198 19 445 A 1

Tabelle 4

Am Prüfstand gemessene Werte der Einflußfaktoren

Arbeitspunkt	Einspritzbeginn SB	Ladedruck PL	AGR-Rate AGR	AGR-Rate AGR	Lufttemperatur am Ladeluft- kühlerausgang TLAD	Lufttemperatur vor dem Einlaßventil TL	Drehzahl DRZ	Drehmoment MD
Nr.	°KW	mbar		%	°C	°C	min ⁻¹	Nm
1	-15	1150	viel	50	35,07	47,22	2000	29,2
2	-15	1050	keine	80	36,41	40,59	2000	30,6
3	-15	1050	mittel	60	34,1	38,65	2000	31,5
4	-3	1050	mittel	60	33,16	38,24	2000	30,2
5	-3	1080	gering	70	33,63	38,61	2000	30,8
6	-15	1150	keine	80	36,62	39,54	2000	30,8
7	-3	1120	maximal	40	36,12	65,31	2000	28,8
8	-3	1050	viel	50	35,9	51,62	1999	30,9
9	-3	1050	maximal	40	34,01	57,73	1999	30,4
10	-15	1150	mittel	60	36,99	42,99	2000	30,7
11	-3	1150	viel	50	37,79	46,08	2003	30,2
12	-3	1150	mittel	60	38,81	42,9	2004	30,7
13	-15	1050	gering	75	34,89	39,2	2004	29,6
14	-9	1080	viel	51	34,42	40,88	2004	30,8
15	-15	1115	maximal	40	35,27	74,17	2004	29,5
16	-3	1150	gering	70	38,03	42,82	2003	29,2
17	-15	1050	viel	50	36,54	43,16	2003	31,3
18	-15	1147	gering	70	38,21	40,5	2003	30,5
19	-7	1118	maximal	40	36,94	75,11	2003	29,5
20	-3	1150	keine	80	39,32	42,38	2004	30,5
21	-15	1054	maximal	40	36,42	60,13	2003	30,4
22	-7	1050	gering	70	35,86	40,83	2003	30,1
23	-3	1053	keine	80	35,2	39,84	2003	29,8

Nach Abschluß der Messungen werden den qualitativen Begriffen für das Stellsignal des Abgasrückführungsventils quantitative Abgasrückführungsdaten AGR zugeordnet. Die Zuordnung ist aus Tabelle 4 ersichtlich.

Aus der Tabelle 4 wird weiterhin deutlich, daß der mittlere Ladedruck PL nicht an allen Arbeitspunkten entsprechend der Vorgabe des Arbeitsplanes (nämlich konstant bei PL = 2 bar) eingestellt werden konnte – vergleiche z. B. die Arbeitspunkte Nr. 15 und Nr. 19. Dieses ist aber für die weitere Analyse nicht kritisch. Wichtig ist lediglich, daß die weitere Analyse und Auswertung nur mit den tatsächlich eingestellten Daten für den Ladedruck PL durchgeführt wird und nicht mit den zuvor geplanten.

Die Ergebnisse der Tabelle 4 zeigen außerdem, daß nicht nur – wie erwartet – erhebliche Variationen der Lufttemperatur im Saugrohr TL aufgetreten sind. Vielmehr wurden auch starke Schwankungen des Drehmoments MD beobachtet. Auch das Drehmoment MD konnte mithin entgegen der Vorgabe des Arbeitsplans nicht an allen Arbeitspunkten auf konstant MD = 30 Nm eingestellt werden. Die ebenfalls zur Kontrolle mitgemessene Lufttemperatur am Ladeluftkühlerausgang TLAD zeigte hingegen nur sehr geringe Schwankungen.

Eine nennenswerte Wirkung der Schwankungen des Drehmoments MD auf die verwendeten Modellansätze ist nicht

DE 198 19 445 A 1

auszuschließen. Daher wird der Modellansatz um die 6 Terme MD, MD², MD · SB, MD · PL, MD · AGR und MD · TL auf 15 + 6 = 21 Terme erweitert. Da insgesamt 23 Arbeitspunkte vermessen wurden, kann ein Modellansatz mit 21 Termen noch berechnet werden.

Die der tatsächlichen Auswertung der Versuchsergebnisse zugrundeliegende Formel lautet somit beispielsweise für die Stickoxidemissionen NOx:

$$\begin{aligned} \text{NOx} = & a_0 + a_{SB} \cdot SB + a_{PL} \cdot PL + a_{AGR} \cdot AGR + a_{TL} \cdot TL + a_{MD} \cdot MD \\ & + a_{SB \cdot PL} \cdot SB \cdot PL + a_{SB \cdot AGR} \cdot SB \cdot AGR + a_{PL \cdot AGR} \cdot PL \cdot AGR \\ & + a_{TL \cdot SB} \cdot TL \cdot SB + a_{TL \cdot PL} \cdot TL \cdot PL + a_{TL \cdot AGR} \cdot TL \cdot AGR \\ & + a_{MD \cdot SB} \cdot MD \cdot SB + a_{MD \cdot PL} \cdot MD \cdot PL + a_{MD \cdot AGR} \cdot MD \cdot AGR \\ & + a_{MD \cdot TL} \cdot MD \cdot TL + a_{SB^2} \cdot SB^2 + a_{PL^2} \cdot PL^2 + a_{AGR^2} \cdot AGR^2 \\ & + a_{TL^2} \cdot TL^2 + a_{MD^2} \cdot MD^2. \end{aligned}$$

Die Meßwerte für die drei Zielgrößen Kraftstoffverbrauch KRSTDS, Rußemission RUSSZ und Stickoxidemission NOx an den 23 Arbeitspunkten auf dem Antriebsprüfstand sind in der folgenden Tabelle 5 dargestellt.

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

DE 198 19 445 A 1

Tabelle 5

Am Prüfstandgemessene Zielgrößen (RUSSZ = Rußzahl, NOx = Stickoxide in ppm, KRSTDS = Kraftstoffdurchsatz in kg/h, AROIST = Luftdurchsatz in hg/h aus dem Signal des Heißfilmsensors)

Arbeitspunkt	Rußzahl RUSSZ	Stickoxide NOx	Kraftstoff- verbrauch KRSTDS	Luft- durchsatz AROIST
Nr.	1	ppm	kg/h	kg/h
1	0,305	372	2,07	111
2	0,285	429	2,03	120
3	0,295	429	2,13	120
4	0,695	155	2,18	121
5	0,675	157	2,16	123
6	0,255	394	2,12	131
7	1,602	90	2,23	77
8	0,915	150	2,19	106
9	1,103	124	2,18	89
10	0,275	389	2,09	127
11	0,825	146	2,3	116
12	0,725	151	2,3	129
13	0,255	414	1,97	120
14	0,725	207	2,16	115
15	1,335	189	2,17	71
16	0,735	149	2,14	131
17	0,365	396	2,07	109
18	0,265	394	2,11	130
19	2,66	85	2,23	70
20	0,755	153	2,25	131
21	0,665	304	2,09	82
22	0,765	186	2,25	120
23	0,655	156	2,22	121

Die drei Zielgrößen wurden am Antriebsprüfstand jeweils in an sich in bekannter Weise gemessen. Außerdem wurde mittels eines Heißfilmsensors zusätzlich der Luftdurchsatz AROIST erfaßt.

Die statistische Analyse und Darstellung der Meßergebnisse geschieht in an sich bekannter Weise ebenfalls mittels der kommerziell erhältlichen, universellen Meßplanungs-, -datenanalyse und -auswertungssoftwarewerkzeuge RS/1 Discover und RS/1 Explore.

Eine statistische Betrachtung der Gewichtung der Meßergebnisse zeigt, daß alle 23 Arbeitspunkte einen wesentlichen Einfluß auf die Modellbildung ausüben (Abb. 1).

Einen Überblick über die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Größen liefert eine lineare Korrelationsanalyse, deren Ergebnis in Tabelle 6 dargestellt ist. Folgende Abhängigkeiten lassen sich z. B. aus der Tabelle 6 ermitteln:

Der Einspritzbeginn SB korreliert geringfügig mit dem Drehmoment MD und stark mit den Stickoxidemissionen NOx und dem Verbrauch KRSTDS. Durch den Ladedruck PL wird das Drehmoment MD, die Temperatur am Ausgang des Ladeluftkühlers TLAD und der Verbrauch KRSTDS beeinflusst. Die Abgasrückführung AGR, das Drehmoment MD und die Saugrohrlufttemperatur TL korrelieren mit allen Zielgrößen. Die konkreten Abhängigkeiten werden in der nachfolgenden Modellanalyse ermittelt.

Tabelle 6

Lineare Korrelationsanalyse der Variablen (aus 23 von 23 Arbeitspunkten)

	SB	PL	AGR	MD	TLAD	TL	KRSTDS	NOx	RUSSZ
SB	1.000	0.030	-0.026	-0.197	0.048	0.027	0.766	-0.796	0.435
PL	0.030	1.000	0.039	-0.288	0.663	0.095	0.265	0.009	0.081
AGR	-0.026	0.039	1.000	0.189	0.184	-0.764	-0.184	0.471	-0.569
MD	-0.197	-0.288	0.189	1.000	-0.041	-0.477	-0.090	0.425	-0.464
TLAD	0.048	0.663	0.184	-0.041	1.000	0.031	0.269	0.047	0.040
TL	0.027	0.095	-0.764	-0.477	0.031	1.000	0.219	-0.566	0.818
KRSTDS	0.766	0.265	-0.184	-0.090	0.269	0.219	1.000	-0.721	0.533
NOx	-0.796	0.009	0.471	0.425	0.047	-0.566	-0.721	1.000	-0.780
RUSSZ	0.435	0.081	-0.569	-0.464	0.040	0.818	0.533	-0.780	1.000

Werte sind signifikant verschieden von 0 (mit 95% Vertrauensintervall, wenn sie in absoluten Zahlen größer als 0.413 sind).

In der Abb. 2 werden die Meßwerte bezüglich der Zielgrößen Stickoxidemission NOx und Russemission (Russzahl) RUSSZ in Abhängigkeit von den Einflußfaktoren Einspritzbeginn SB, Ladedruck PL und Saugrohrlufttemperatur TL dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die optimalen Werte für die gleichzeitige Minimierung beider Größen mit einem Einspritzbeginn SB von -3°KW erreicht werden. Eine exaktere Analyse kann aus den Modellen entwickelt werden.

Die weitere Auswertung wird im folgenden anhand der Zielgröße Stickoxidemission NOx gezeigt. Die Auswertung verläuft für die beiden anderen Zielgrößen Kraftstoffverbrauch KRSTDS und Russemission (Russzahl) RUSSZ analog. Der Auswertung der Versuchsergebnisse für die Stickoxidemissionen NOx liegt wie oben angegeben folgende Formel zugrunde:

$$\begin{aligned}
 \text{NOx} = & a_0 + a_{\text{SB}} \cdot \text{SB} + a_{\text{PL}} \cdot \text{PL} + a_{\text{AGR}} \cdot \text{AGR} + a_{\text{TL}} \cdot \text{TL} + a_{\text{MD}} \cdot \text{MD} \\
 & + a_{\text{SB} \cdot \text{PL}} \cdot \text{SB} \cdot \text{PL} + a_{\text{SB} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{SB} \cdot \text{AGR} + a_{\text{PL} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{PL} \cdot \text{AGR} \\
 & + a_{\text{TL} \cdot \text{SB}} \cdot \text{TL} \cdot \text{SB} + a_{\text{TL} \cdot \text{PL}} \cdot \text{TL} \cdot \text{PL} + a_{\text{TL} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{TL} \cdot \text{AGR} \\
 & + a_{\text{MD} \cdot \text{SB}} \cdot \text{MD} \cdot \text{SB} + a_{\text{MD} \cdot \text{PL}} \cdot \text{MD} \cdot \text{PL} + a_{\text{MD} \cdot \text{AGR}} \cdot \text{MD} \cdot \text{AGR} \\
 & + a_{\text{MD} \cdot \text{TL}} \cdot \text{MD} \cdot \text{TL} + a_{\text{SB}^2} \cdot \text{SB}^2 + a_{\text{PL}^2} \cdot \text{PL}^2 + a_{\text{AGR}^2} \cdot \text{AGR}^2 \\
 & + a_{\text{TL}^2} \cdot \text{TL}^2 + a_{\text{MD}^2} \cdot \text{MD}^2.
 \end{aligned}$$

Es handelt sich hierbei um ein quadratisches Polynom mit fünf Variablen, nämlich dem Kraftstoffeinspritzbeginn SB, dem mittleren Ladedruck PL, der Abgasrückführrate AGR, der Lufttemperatur im Saugrohr vor dem Einlaßventil TL und dem Drehmoment MD. Die mathematische Funktion enthält insgesamt 21 Terme und dementsprechend 21 freie Parameter, nämlich die Koeffizienten a_x des quadratischen Polynoms.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Größe der zu ermittelnden Werte für die 21 Parameterkoeffizienten a_x und damit der Bedeutung der verschiedenen Variablen werden die Werte der Variablen der Polynomfunktion für die Stickoxidemission NOx jeweils auf einen einheitlichen Wertebereich transformiert und normiert, und zwar in dem der jeweils kleinste eingestellte Einstellwert f_{\min} gleich -1 gesetzt wird und der jeweils größte eingestellte f_{\max} auf +1 gesetzt wird. Beispielsweise wird beim Ladedruck PL der kleinste gemessene Einstellwert von PL = 1050 mbar gleich -1 gesetzt, während der größte gemessene Einstellwert von PL = 1150 mbar gleich +1 gesetzt wird. Dementsprechend wird die kleinste gemessene Abgasrückführungsrate AGR von AGR = 40% gleich -1 gesetzt, während die größte gemessene Abgasrückführungsrate von AGR = 80% gleich +1 gesetzt wird. Diese normierende Transformation erleichtert wie angegeben den Vergleich der Bedeutung der einzelnen Terme für das Zielgrößenergebnis NOx, da der numerische Wert der ermittelten Polynomkoeffizienten dann deren Bedeutung für das Zielgrößenergebnis direkt widerspiegelt. Die Auswertung kann aber auch selbstverständlich ohne eine solche normierende Transformation vorgenommen werden. Die Transformation muß auch nicht für alle Variablen vorgenommen werden; im Ausführungsbeispiel wurde beispielsweise für den Einflußfaktor Lufttemperatur vor dem Einlaßventil TL und dessen Quadrat TL^2 darauf verzichtet (vergleiche Tabellen 7 und 8).

Die Anpassung der einzelnen 21 Parameter der verwendeten Polynomfunktion an die Ergebnisse in den 23 Arbeitspunkten geschah mittels eines bekannten statistischen Auswerteverfahrens, nämlich mittels des bekannten Verfahrens der kleinsten Quadrate anhand einer Regressionsgerade. Dazu wurden wiederum die kommerziell erhältlichen, universellen Meßplanungs-, -datenanalyse und -auswertungssoftwarewerkzeuge RS/1 Discover und RS/1 Explore verwendet. Die Tabelle 7 zeigt den vollständigen Modellansatz mit allen 21 ermittelten Parameterkoeffizienten der 21 Terme des für die Stickoxidemission NOx verwendeten quadratischen Polynom-Ansatzes.

DE 198 19 445 A 1

Tabelle 7

Vollständiges Modell für den Massenstrom der Stickoxidemission

Koeffizienten für LS, Zielgröße NOx				
Term	Koeff. a _x	Std.abw.	T-Wert	Signif.
1 1	116.836004	89.633137	1.30	0.3223
2 -SB	-55.133720	5.604357	-9.84	0.0102
3 -PL	22.144801	27.824673	0.80	0.5096
4 -AGR	1.167346	49.049756	0.02	0.9832
5 -MD	20.140600	27.008276	0.75	0.5336
6 -SB*PL	-0.582767	0.583164	-1.00	0.4229
7 -SB*AGR	1.074790	1.319033	0.81	0.5008
8 -SB*MD	-0.450068	1.425292	-0.32	0.7821
9 -PL*AGR	-2.758707	2.443391	-1.13	0.3761
10 -PL*MD	-2.112677	2.151024	-0.98	0.4296
11 -AGR*MD	-0.446591	4.643464	-0.10	0.9321
12 -SB**2	9.256800	2.377801	3.89	0.0601
13 -PL**2	6.575369	3.261768	2.02	0.1814
14 -AGR**2	-4.224712	3.401141	-1.24	0.3401
15 -MD**2	-3.627114	3.457786	-1.05	0.4043
16 -TL	-2.425010	3.837210	-0.63	0.5920
17 -TL**2	0.015405	0.040613	0.38	0.7410
18 -TL*SB	0.716589	0.117707	6.09	0.0259
19 -TL*PL	-0.444439	0.653277	-0.68	0.5665
20 -TL*AGR	0.096197	1.086991	0.09	0.9375
21 -TL*MD	-0.372205	0.597656	-0.62	0.5970

Es wird insbesondere aus der letzten Spalte (Signifikanz) deutlich, daß viele Terme keine Bedeutung für die NOx-Emission haben. Die Terme mit T-Werten kleiner 1 können eliminiert, das heißt aus der der Auswertung zugrundeliegenden Polynomfunktionsformel weggelassen werden. Dieses sollte jedoch in einzelnen Schritten – beginnend mit dem Term jeweils kleinster Signifikanz – erfolgen, da nach jedem Entfernen eines Terms die Signifikanz der übrigen sich aufgrund der veränderten, der statistischen Anpassung zugrundeliegenden Polynomfunktionsformel neu berechnet. Da aufgrund der 23 Arbeitspunkte zwei Meßwerte mehr vorliegen, als zur Bestimmung der 21 Polynomkoeffizienten notwendig sind, werden in an sich bekannter Weise innerhalb des Auswerteprogramms statistische Ausgleichsmethoden eingesetzt.

Werden alle Polynomterme, die keinen signifikanten Einfluß auf die Stickoxidemission NOx ausüben, aus dem vollständigen Modellansatz gemäß Tabelle 7 entfernt, bleiben noch zehn signifikante Terme übrig. Diese zehn signifikanten Terme sind in der folgenden Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8

Modell für die Stickoxidemissionen NOx mit allen signifikanten Termen

Koeffizienten für LS, Zielgröße NOx				
Term	Koeff. a _x	Std.abw.	T-Wert	Signif.
1 1	72.478644	4.803930	15.09	0.0001
2 -SB	-51.674042	1.931396	-26.75	0.0001
3 -PL	1.812678	0.460408	3.94	0.0017
4 -AGR	6.898174	1.196411	5.77	0.0001
5 -MD	2.554958	0.665147	3.84	0.0020
6 -SB**2	8.185808	1.341441	6.10	0.0001
7 -PL**2	4.212964	1.419855	2.97	0.0109
8 -AGR**2	-4.938841	1.577394	-3.13	0.0080
9 -TL	-0.676348	0.101358	-6.67	0.0001
10 -TL*SB	0.635087	0.040353	15.74	0.0001

Die ermittelte Formel für die Stickoxidemission NOx reduziert sich damit auf folgenden Ausdruck:

$$\text{NOx} = a_0 + a_{\text{SB}} \cdot \text{SB} + a_{\text{PL}} \cdot \text{PL} + a_{\text{AGR}} \cdot \text{AGR} + a_{\text{TL}} \cdot \text{TL} + a_{\text{MD}} \cdot \text{MD} + a_{\text{TL} \cdot \text{SB}} \cdot \text{TL} \cdot \text{SB} + a_{\text{SB}^2} \cdot \text{SB}^2 + a_{\text{PL}^2} \cdot \text{PL}^2 + a_{\text{AGR}^2} \cdot \text{AGR}^2.$$

Zusätzlich wurde eine Kontrollberechnung durchgeführt, ob nicht ein anderer Modellansatz, d. h. die Beschreibung der Stickoxidemission NOx mittels einer anderen mathematischen Funktion, zu einer besseren Beschreibung des Verhaltens der Stickoxidemission NOx führt. Bei der der Auswertung zugrundeliegenden Formel entspricht das quadratische Polynom der Stickoxidemission NOx selbst. Versuchsweise wurden auch die Fälle durchgerechnet, daß dasselbe quadratische Polynom statt dessen dem Inversen (1/NOx) der Stickoxidemission NOx, dem Inversen der Wurzel (1/SQRT[NOx]), dem Logarithmus (log NOx), der Wurzel (SQRT[NOx]) bzw. dem Quadrat (NOx²) der Stickoxidemission NOx entspricht. Diese Berechnungen geschahen ebenfalls in an sich bekannter Weise mittels der Softwarewerkzeuge RS/1 Discover und RS/1 Explore. In Abb. 3 ist die Wirkung der verschiedenen Funktionsmodellansätze auf den Fehler der Residuen dargestellt. Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den einzelnen Funktionsansätzen zeigte sich, daß für die Stickoxidemission NOx kein Modellwechsel notwendig ist.

Die Wirkungen der fünf ermittelten Haupteinflussfaktoren Kraftstoffeinspritzbeginn SB, Ladedruck PL, Abgasrückföhrate AGR, Drehmoment MD und Lufttemperatur im Saugrohr TL auf die Zielgröße Stickoxidemission NOx sowie der Einfluß dieser fünf Modelleinflussfaktoren sind in den Abb. 4 und 5 dargestellt.

Die Abb. 6 zeigt die aus der bestimmten Formel ermittelten Werte der Stickoxidemission NOx in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren Spritzbeginn SB und mittlerer Ladedruck PL. Die Abgasrückföhrate AGR ist dabei auf AGR = 60%, das Drehmoment MD auf MD = 30 Nm und die Lufttemperatur vor dem Einlaßventil auf TL = 56,675°C festgelegt.

Da nunmehr ein vollständiges, sehr gut per Computer verarbeitbares Modell für die Stickoxidemission NOx gemäß Tabelle 8 vorliegt, können mit der ermittelten Formel auf einfache Weise zahlreiche Berechnungen durchgeführt werden. Minimiert man beispielsweise im Rechenmodell den Kraftstoffverbrauch KSTDS unter der Beschränkung, daß die Stickoxidemission NOx zur Erfüllung gesetzlicher Forderungen nie mehr als NOx = 30 g/h betragen darf, so erhält man die optimierten Werte gemäß Tabelle 9.

In Abb. 7 ist für einen Betriebspunkt das Kennfeld anhand der ermittelten Formel gemäß Tabelle 8 berechnet und grafisch dargestellt.

Tabelle 9

Ergebnis einer Optimierung des Kraftstoffdurchsatzes KRSTDS mit der Beschränkung der Stickoxidemissionen NOx auf NOx < 30 g/h

Faktoren, Zielgrößen	Bereich	Startwerte	Optimum
1 Faktoren			
2 SPRITZBEGINN	-15 to -3	-12	-3.005
3 LADEDRUCK	1050 to 1150	1100	1095.8
4 ABGASRUECKFUEHR	40 to 80	60	40.169
5 MOMENT	30		30
6 T_EINLASS	38.24 to 75.11	56.67	41.47
7			
8 Zielgrößen			
9 VERBRAUCH	MIN		2.0919
10 NOX	<30		15.461
11 PARTIKEL			1.2378
12 RUSS			0.71468

Die Ergebnisse verdeutlichen, daß mit Hilfe der Erfindung in einem Parameterraum mit 5 Einflussfaktoren (SB, PL, AGR, MD, TL) die Anzahl der Meßpunkte um mehr als den Faktor 10 verringert werden kann. Ohne die Verwendung des neuartigen Verfahrens zur Bestimmung von Kennfelddaten bzw. Motorsteuerparametern wären 7 · 4 · 5 · 3 = 420 Arbeitspunkte zu vermessen gewesen (sofern man die Schwankungen des Drehmoments im Experiment als drei einzustellende Drehmomentwerte MD von MD = 29, 30 und 31 Nm betrachtet). Obwohl statt dessen nur 23 Arbeitspunkte vermessen wurden, gelingt dennoch eine Aussage über Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren und den Zielgrößen in einer Form, die insbesondere auch die verkoppelten Abhängigkeiten beschreibt. In der Abb. 8 ist nochmals das Prinzip der beschleunigten Kennfeldwert- bzw. Parameterwertermittlung gemäß der Erfindung zusammengefaßt.

In Weiterbildung der Erfindung läßt sich die bei der Auswertung der experimentell auf dem Motorprüfstand gemessenen Meßwerte ermittelte Formel nicht nur zur Berechnung eines Kennlinienfeldes ausnutzen, sondern man kann die ermittelten Koeffizienten des quadratischen Polynoms direkt zur Steuerung des Motors einsetzen.

In Motorsteuergeräten wird üblicherweise das Drehmoment MD in Form einer Look-up-Tabelle (eben einer numerischen Darstellung des mehrdimensionalen Kennlinienfeldes) in der Speichereinheit abgelegt. Statt die gesamte Look-up-Tabelle in der Speichereinheit abzuspeichern, werden nun nurmehr die ermittelten Koeffizienten des Polynoms in der Speichereinheit abgelegt. Dazu wird nach Ermittlung der Koeffizienten des oben angegebenen, der Meßauswertung zugrundeliegenden Polynoms für NOx dieses in die folgende Normalform für MD gebracht:

$$\begin{aligned}
 MD^2 + (1/a_{MD2}) \cdot (a_{MD} + a_{MD} \cdot SB + a_{MD} \cdot PL + a_{MD} \cdot AGR + a_{MD} \cdot TL) \cdot MD \\
 + (1/a_{MD2}) \cdot (a_0 + a_{SB} \cdot SB + a_{PL} \cdot PL + a_{AGR} \cdot AGR + a_{TL} \cdot TL + a_{SB} \cdot PL + a_{SB} \cdot AGR + a_{PL} \cdot AGR + a_{PL} \cdot TL + a_{TL} \cdot SB + a_{TL} \cdot PL \\
 + a_{TL} \cdot AGR + a_{SB2} \cdot SB^2 + a_{PL2} \cdot PL^2 + a_{AGR2} \cdot AGR^2 + a_{TL2} \cdot TL^2
 \end{aligned}$$

– NOx) = 0

und anschließend in bekannter Weise nach dem Drehmoment MD aufgelöst:

$$\begin{aligned} MD_{1/2} = & -(1/2 \cdot a_{MD2}) \cdot (a_{MD} + a_{MD} \cdot SB \cdot SB + a_{MD} \cdot PL \cdot PL + a_{MD} \cdot AGR \cdot AGR + a_{MD} \cdot TL \cdot TL) \\ & \pm \{ (1/2 \cdot a_{MD2})^2 \cdot (a_{MD} + a_{MD} \cdot SB \cdot SB + a_{MD} \cdot PL \cdot PL + a_{MD} \cdot AGR \cdot AGR \\ & + a_{MD} \cdot TL \cdot TL)^2 - (1/a_{MD2}) \cdot (a_0 + a_{SB} \cdot SB + a_{PL} \cdot PL + a_{AGR} \cdot AGR \\ & + a_{TL} \cdot TL + a_{SB} \cdot PL \cdot SB \cdot PL + a_{SB} \cdot AGR \cdot SB \cdot AGR + a_{PL} \cdot AGR \cdot PL \cdot AGR \\ & + a_{TL} \cdot SB \cdot TL \cdot SB + a_{TL} \cdot PL \cdot TL \cdot PL + a_{TL} \cdot AGR \cdot TL \cdot AGR + a_{SB2} \cdot SB^2 \\ & + a_{PL2} \cdot PL^2 + a_{AGR2} \cdot AGR^2 + a_{TL2} \cdot TL^2 - NOx) \}^{1/2}. \end{aligned} \quad \begin{matrix} 5 \\ 10 \end{matrix}$$

Für die auf zehn signifikante Terme reduzierte Formel gemäß Tabelle 8 lauten die Zusammenhänge statt dessen:

$$\begin{aligned} MD = & -(1/a_{MD}) \cdot (a_0 + a_{SB} \cdot SB + a_{PL} \cdot PL + a_{AGR} \cdot AGR + a_{TL} \cdot TL - NOx \\ & + a_{TL} \cdot SB \cdot TL \cdot SB + a_{SB2} \cdot SB^2 + a_{PL2} \cdot PL^2 + a_{AGR2} \cdot AGR^2). \end{aligned} \quad 15$$

Ergeht nun von der Steuer- und Recheneinheit des Motorsteuergerätes eine Anforderung eines bestimmten, benötigten Drehmoments MD, so wird nicht mehr dieser benötigte Wert des Drehmoments und seine ihn bestimmenden Einflußfaktoren in einer in der Speichereinheit gespeicherten Look-up-Tabelle ermittelt, sondern die Parameter werden derart festgelegt, daß sich aus der angegebenen Formel gerade das geforderte Drehmoment ergibt. Wie Versuche ergeben haben, ist es bereits mit einer geringen Anzahl von gemessenen Arbeitspunkten möglich, das angeforderte Drehmoment mit einer Genauigkeit von 2 bis 3% zu treffen. Dieser Wert liegt im Bereich der Serienstreuung bei der Serienfertigung von Verbrennungsmotoren, so daß eine darüber hinaus gehende Genauigkeit der Drehmomentsteuerung – die entsprechend mehr gemessene Arbeitspunkte erfordern würde – unnötig ist. 20

Verwendet man mithin zur Steuerung des Verbrennungsmotors lediglich die bei vorangegangenen Arbeitspunkt-Messungen ermittelten Funktionsparameter und nicht mehr das komplette Kennlinienfeld, so lassen sich beträchtliche Einsparungen an Speicherplatz erzielen. Die Speicherung von 7000 Punkten eines mehrdimensionalen Kennlinienfeldes erfordert beispielsweise bei einer Genauigkeit von jeweils 8 bit = 1 Byte eine Speicherkapazität von etwa 7 kByte; werden statt dessen z. B. die Parameterkoeffizienten eines quadratischen Polynoms mit insgesamt 21 Termen abgespeichert, so werden bei vergleichbarer, für die Praxis völlig ausreichender Genauigkeit nur 21 Byte benötigt. Für die Auswertung des Polynoms wird keine leistungsstärkere Steuer- und Recheneinheit im Motorsteuergerät benötigt als bei der Abspeicherung aller Werte des Kennlinienfeldes: auch bei konventionellen Motorsteuerverfahren und -geräten müssen nämlich laufend Interpolationsaufgaben berechnet werden, da ein realer Motor nur selten bezüglich aller Parameter genau auf solchen Werten läuft, die in der Look-up-Tabelle abgespeichert sind. 25 30

Durch das erfindungsgemäße Steuerverfahren für einen Verbrennungsmotor wird also ein Aufbau eines elektronischen Motorsteuergerätes ermöglicht, der mit wesentlich geringerem Speicherplatz in der Speichereinheit auskommt, ohne daß dadurch andere Komponenten des Motorsteuergerätes leistungsstärker und daher kostspieliger ausgelegt werden müßten. 35

Patentansprüche 40

1. Verfahren zur Bestimmung von Kennfelddaten zur Kennfeldsteuerung eines Verbrennungsmotors, dadurch gekennzeichnet, daß

- einer oder mehreren Zielgrößen jeweils eine mathematische Funktion von jeweils einem oder mehreren Einflußfaktoren zugeordnet wird, wobei die Funktion jeweils eine Abhängigkeit der Zielgröße von dem bzw. den Einflußfaktoren anhand eines oder mehrerer Parameter beschreibt, 45
- in experimentellen Versuchen ein oder mehrere Meßwerte für den Verbrennungsmotor gemessen werden, wobei die Anzahl der Meßwerte mindestens gleich der maximalen Anzahl der in einer verwendeten Funktion vorkommenden Parameter ist,
- anschließend anhand der Meßwerte die Parameter für die einen oder mehreren mathematischen Funktionen der einen oder mehreren Einflußfaktoren berechnet werden, 50
- und anschließend anhand der berechneten Parameter weitere Zielgrößenwerte als Funktionswerte der einen oder mehreren mathematischen Funktionen berechnet werden, wobei die Zielgrößenwerte Kennfelddaten darstellen oder aus ihnen sich Kennfelddaten gewinnen lassen.

2. Verfahren zur Bestimmung von einem oder mehreren Parametern für eine oder mehrere mathematische Funktionen zur Steuerung eines Verbrennungsmotors, dadurch gekennzeichnet, daß 55

- einer oder mehreren Zielgrößen jeweils eine mathematische Funktion von jeweils einem oder mehreren Einflußfaktoren zugeordnet wird, wobei die Funktion jeweils eine Abhängigkeit der Zielgröße von dem bzw. den Einflußfaktoren anhand eines oder mehrerer Parameter beschreibt,
- in experimentellen Versuchen ein oder mehrere Meßwerte für den Verbrennungsmotor gemessen werden, wobei die Anzahl der Meßwerte mindestens gleich der maximalen Anzahl der in einer verwendeten Funktion vorkommenden Parameter ist, und 60
- anschließend anhand der Meßwerte die Parameter für die einen oder mehreren mathematischen Funktionen der einen oder mehreren Einflußfaktoren berechnet werden.

3. Verfahren zur Steuerung eines Verbrennungsmotors, dadurch gekennzeichnet, daß 65

- mindestens ein Einflußfaktor repräsentierender Eingangswert einem Motorsteuergerät zugeführt wird,
- anhand des mindestens einen Eingangswertes und mindestens eines Parameters mindestens einer mathematischen Funktion, die im Motorsteuergerät gespeichert ist, sowie ggf. weiterer Werte und/oder im Motorsteuer-

- gerät gespeicherter Regeln ein Ausgangswert im Motorsteuergerät errechnet wird,
 – wobei die mathematische Funktion die Abhängigkeit einer Zielgröße von mindestens einem Einflußfaktor anhand des mindestens einem Parameters beschreibt, und
 – der Ausgangswert zur Steuerung des Verbrennungsmotors ausgegeben wird.
- 5 4. Elektronisches Motorsteuergerät zur Steuerung eines Verbrennungsmotors, wobei das Motorsteuergerät eine Speichereinheit, eine Rechen- und Datenverarbeitungseinheit, mindestens einen Eingangskanal und mindestens einen Ausgangskanal umfaßt, dadurch gekennzeichnet, daß
 – in der Speichereinheit mindestens ein Parameter mindestens einer mathematischen Funktion speicherbar ist, wobei die Funktion die Abhängigkeit einer Zielgröße von mindestens einem Einflußfaktor anhand des mindestens einen Parameters beschreibt,
 10 – über den mindestens einen Eingangskanal mindestens ein Einflußfaktor repräsentierender Eingangswert dem Motorsteuerungsgerät zuführbar ist und
 – anhand des mindestens einen Eingangswertes und des mindestens einen Parameters sowie ggf. weiterer Werte und/oder im Motorsteuergerät gespeicherter Regeln in der Rechen- und Datenverarbeitungseinheit mindestens ein Ausgangswert zur Steuerung des Verbrennungsmotors berechenbar und
 15 – über den mindestens einen Ausgangskanal ausgebbar ist.
5. Verfahren bzw. elektronisches Motorsteuergerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die eine oder mehreren Zielgrößen
 – der Treibstoffverbrauch KRSTDS und/oder
 20 – die Stickoxid-Emission NOx und/oder
 – die Rußemission RUSSZ
 sind.
6. Verfahren bzw. elektronisches Motorsteuergerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Einflußfaktoren kontrollierbare Einflußfaktoren und/oder nicht kontrollierbare Einflußfaktoren
 25 sind.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die kontrollierbaren Einflußfaktoren
 – der Kraftstoffeinspritzbeginn SB und/oder
 – der mittlere Ladedruck PL und/oder
 – die Abgasrückführrate AGR und/oder
 30 – das Drehmoment MD und/oder
 – die Motordrehzahl DRZ
 sind.
8. Verfahren bzw. elektronisches Motorsteuergerät nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die nicht kontrollierbaren Einflußfaktoren
 35 – die Lufttemperatur im Saugrohr vor dem Einlaßventil TL und/oder
 – die Lufttemperatur am Ausgang des Ladeluftkühlers TLAD und/oder
 – die Kühlwassertemperatur TW
 sind.
9. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Anzahl der Meßwerte größer als die maximale Anzahl der in einer verwendeten Funktion vorkommenden Parameter ist, um mittels an sich bekannter statistischer Methoden, insbesondere statistischer Ausgleichsverfahren, die Anpaßgenauigkeit der Parameter zu erhöhen.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß das verwendete statistische Ausgleichsverfahren das Verfahren der kleinsten Quadrate mittels einer Regressionsgerade ist.
- 45 11. Verfahren bzw. elektronisches Motorsteuergerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Funktion
 – ein Polynom ist und/oder
 – eine Exponential-Funktion ist, wobei das Argument der Exponential-Funktion ein Polynom ist, und/oder
 – eine logarithmische Funktion ist, wobei das Argument der logarithmischen Funktion ein Polynom ist, und/oder
 50 oder
 – eine quadratische Funktion ist, wobei das Argument der quadratischen Funktion ein Polynom ist, und/oder
 – eine inverse Funktion ist, wobei das Argument der inversen Funktion ein Polynom ist, und/oder
 – eine Wurzelfunktion ist, wobei das Argument der Wurzelfunktion ein Polynom ist, und/oder
 – eine inverse Wurzelfunktion ist, wobei das Argument der inversen Wurzelfunktion ein Polynom ist.
12. Verfahren bzw. elektronisches Motorsteuergerät nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Polynom ein quadratisches Polynom eines oder mehrerer Variabler ist, wobei die Variablen die Einflußfaktoren sind.
13. Verfahren bzw. elektronisches Motorsteuergerät nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Parameter die Koeffizienten des Polynoms sind.
14. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß nach der Berechnung der Parameter der einer oder mehreren Funktionen der einer oder mehreren Einflußfaktoren überprüft wird, welche Einflußfaktoren jeweils
 60 nur einen im Rahmen der geforderten Genauigkeit vernachlässigbaren Einfluß auf die eine oder mehreren Zielgrößen haben, und diese bestimmten, vernachlässigbaren Einflußfaktoren daraufhin in der jeweils betrachteten Funktion nicht mehr berücksichtigt werden.
15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß sukzessive der jeweils am meisten vernachlässigbare Einflußfaktor – d. h. der Einflußfaktor mit der geringsten Bedeutung für die jeweilige Zielgröße – bestimmt wird und anschließend die Berechnung der Parameter der jeweiligen Funktion für die jeweilige Zielgröße unter Weglassung des derart bestimmten Einflußfaktors wiederholt wird.
- 65 16. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß vor Beginn der experimentellen Messungen

DE 198 19 445 A 1

für einige oder jeden experimentell kontrollierbaren Einflußfaktor ein kleinster Einstellwert f_{\min} sowie ein größter Einstellwert f_{\max} festgelegt werden und zwischen diesen Werten f_{\min} und f_{\max} kein, ein oder mehrere weitere Zwischeneinstellwerte zur Messung festgelegt werden.

17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Zwischeneinstellwerte äquidistant festgelegt werden.

18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Einstellwerte mehrerer oder aller Einflußfaktoren zur besseren Vergleichbarkeit der Parameter dahingehend nomiert werden, daß ihr kleinster einzustellender Wert f_{\min} jeweils gleich einem bestimmten, übereinstimmenden numerischen Wert – insbesondere 0 oder –1 – gesetzt wird, während ihr größter einzustellender Wert f_{\max} jeweils gleich einem anderen, übereinstimmenden numerischen Wert – insbesondere +1 – gesetzt wird.

19. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß während der experimentellen Messungen ein oder mehrere weitere mögliche Einflußgrößen jeweils mitgemessen werden und – sofern sich bei der Auswertung der Messungen erweist, daß diese möglichen Einflußgrößen einen im Rahmen der geforderten Genauigkeit nicht vernachlässigbaren Einfluß auf eine oder mehrere Zielgrößen haben – zumindest diese nicht vernachlässigbaren weiteren Einflußgrößen dann als Einflußfaktoren in die mathematische(n) Funktion(en) der einen oder mehreren Zielgrößen einbezogen werden.

20. Verfahren bzw. elektronisches Motorsteuergerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Zielgrößen

- das Drehmoment MD und/oder
- die Katalysatortemperatur TKAT und/oder
- die Abgastemperatur TA

sind.

21. Verfahren bzw. elektronisches Motorsteuergerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Einflußfaktoren

- die Drehzahl DRZ und/oder
- der Lambda-Wert LAMA und/oder
- der Zündwinkel ZWOUT und/oder
- die Last RLW und/oder
- der mittlere Ladedruck PL

sind.

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

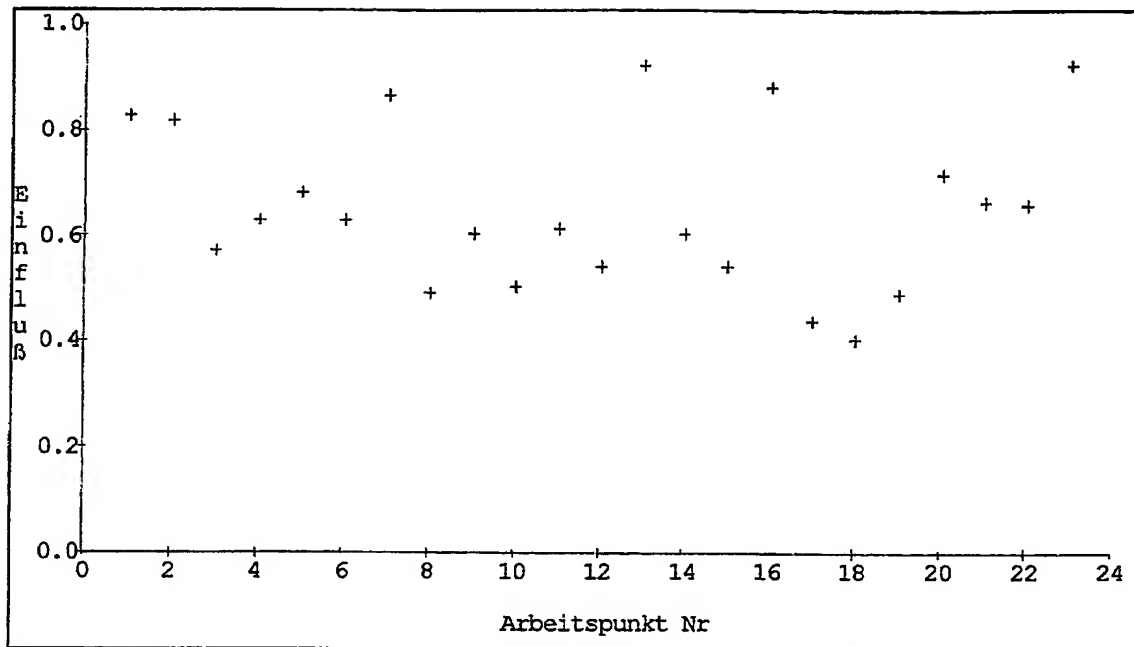


Abbildung 1: Einfluß der 23 Arbeitspunkte auf die Modellbildung

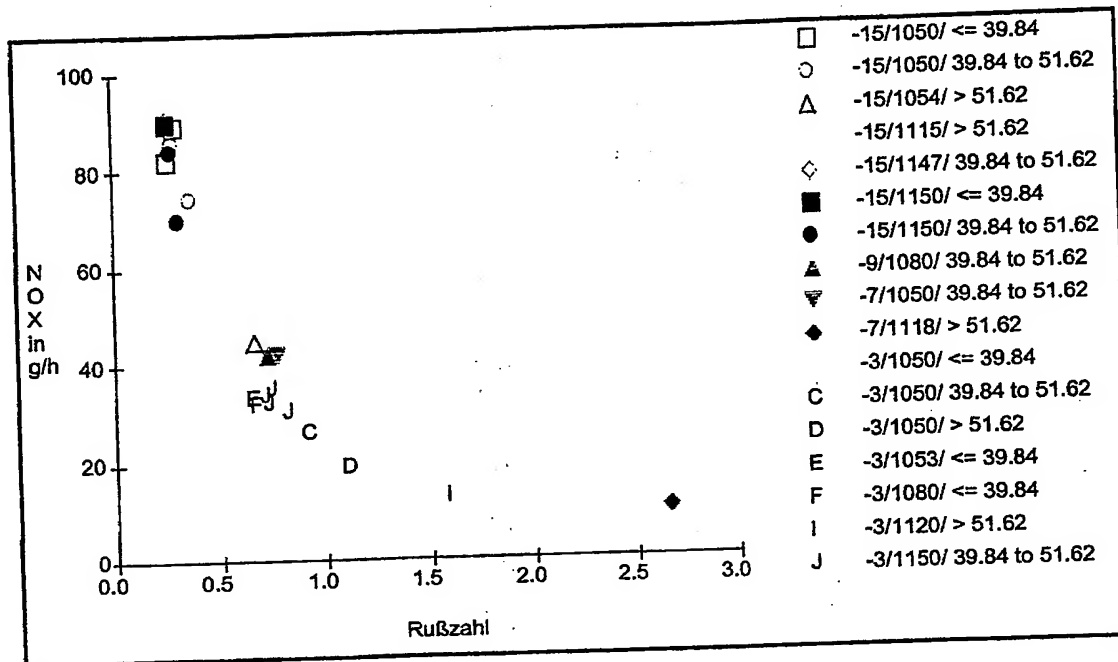


Abbildung 2: Abhängigkeiten der Ruß- und Stickoxid-Emissionen RUSSZ und NO_x in g/h von Einspritzbeginn SB in °KW / Ladedruck PL in mbar / Lufttemperatur im Saugrohr TL in °C

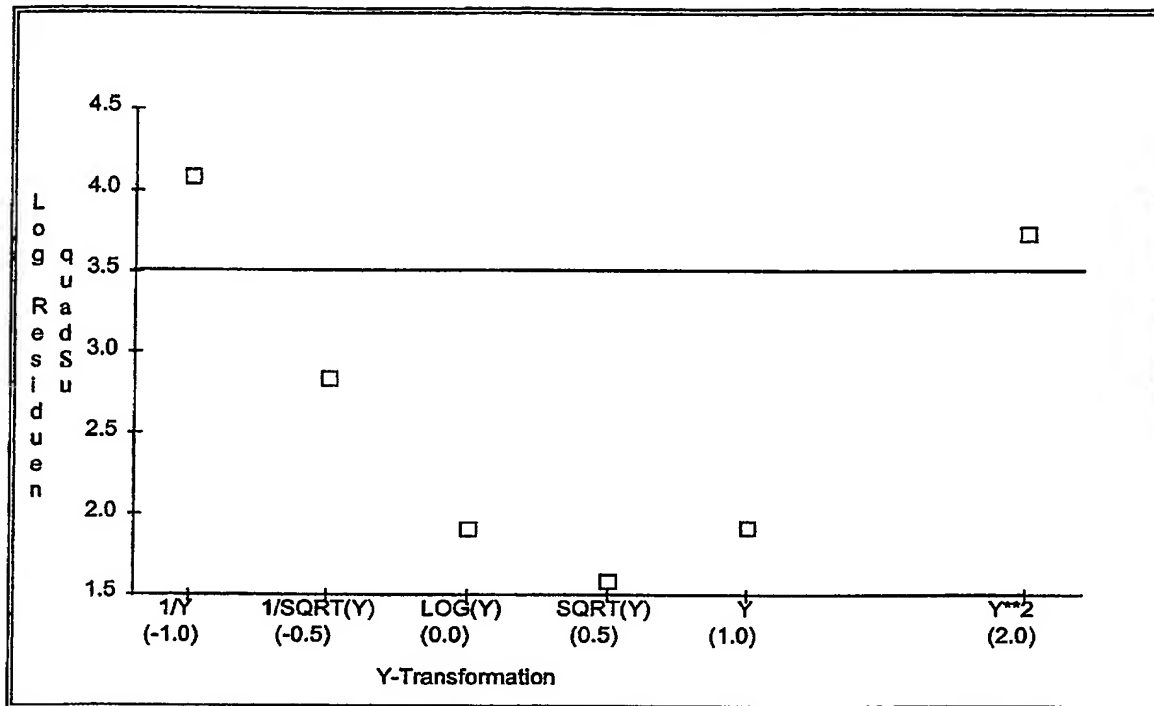


Abbildung 3: Resultat der unterschiedlichen Modellansätze für das Stickoxid-Modell NO_x bei Berücksichtigung von 21 Termen. Die tatsächlich verwendete Modellfunktion ist markiert.

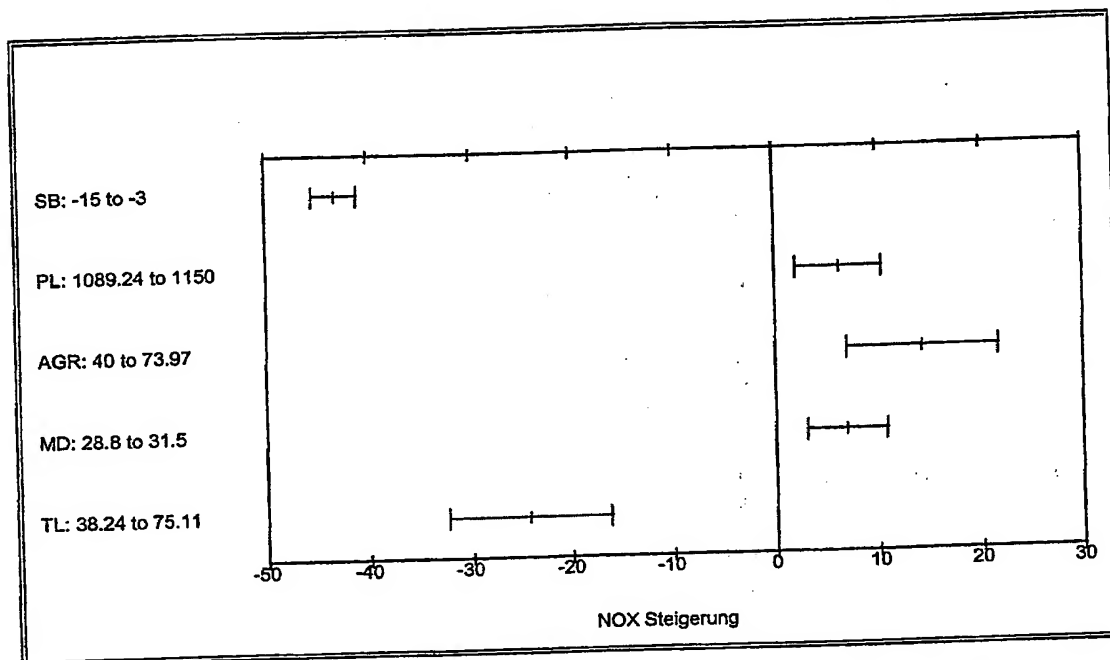


Abbildung 4: Wirkung der Haupteinflußgrößen auf die Stickoxidemissionen NO_x, mit 95% Vertrauensintervall

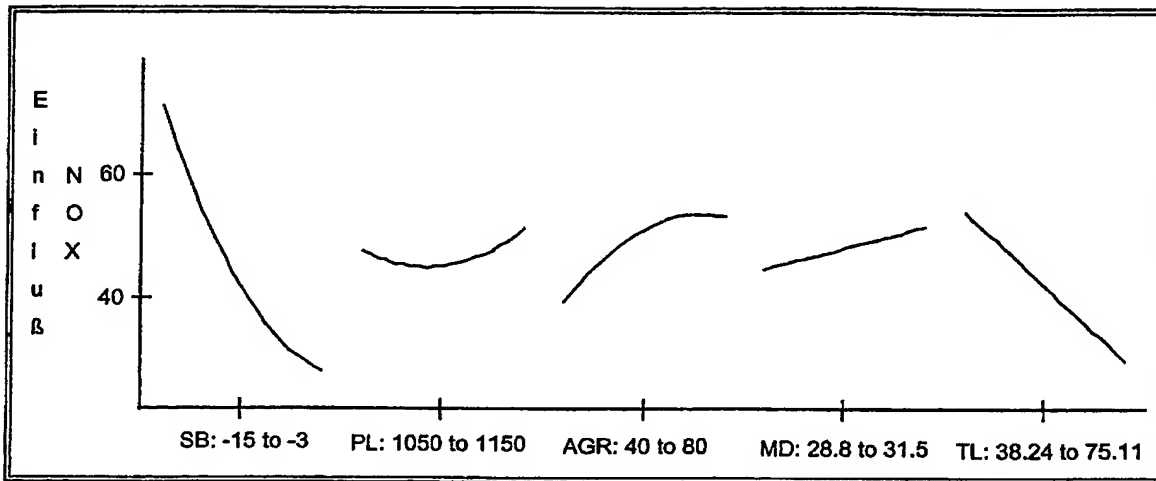


Abbildung 5: Einfluß der Modellterme auf die Stickoxidemission NO_x

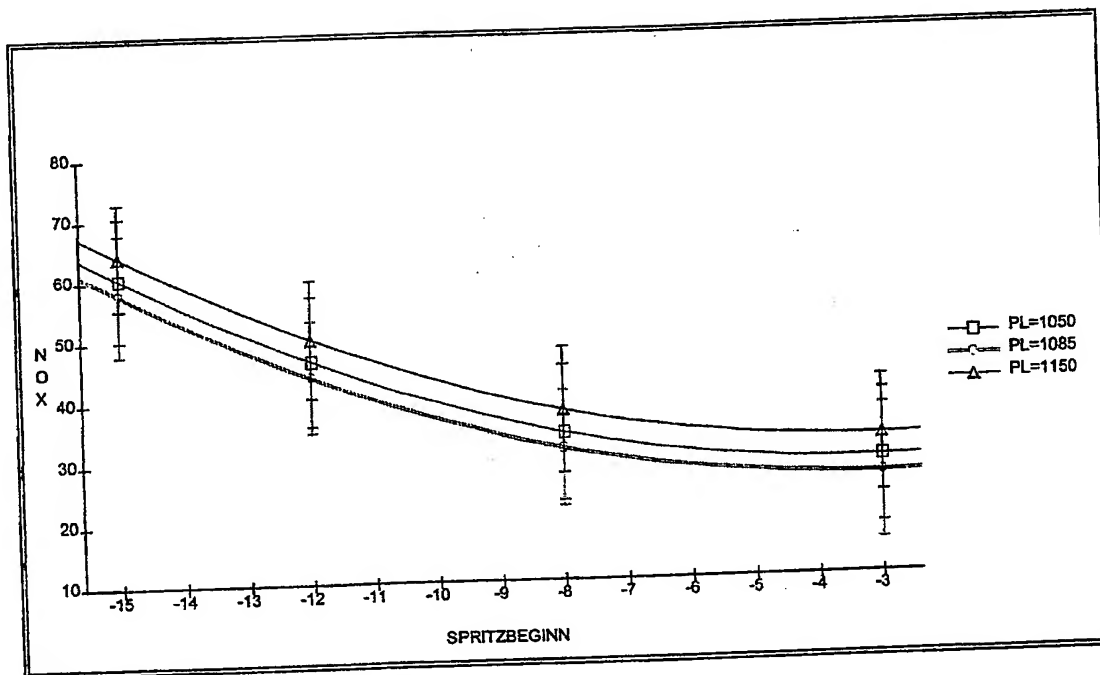


Abbildung 6: Stickoxidemission NOx in g/h in Abhängigkeit vom Spritzbeginn SB in °KW und Ladedruck PL in mbar, mit 95% Vertrauensintervall

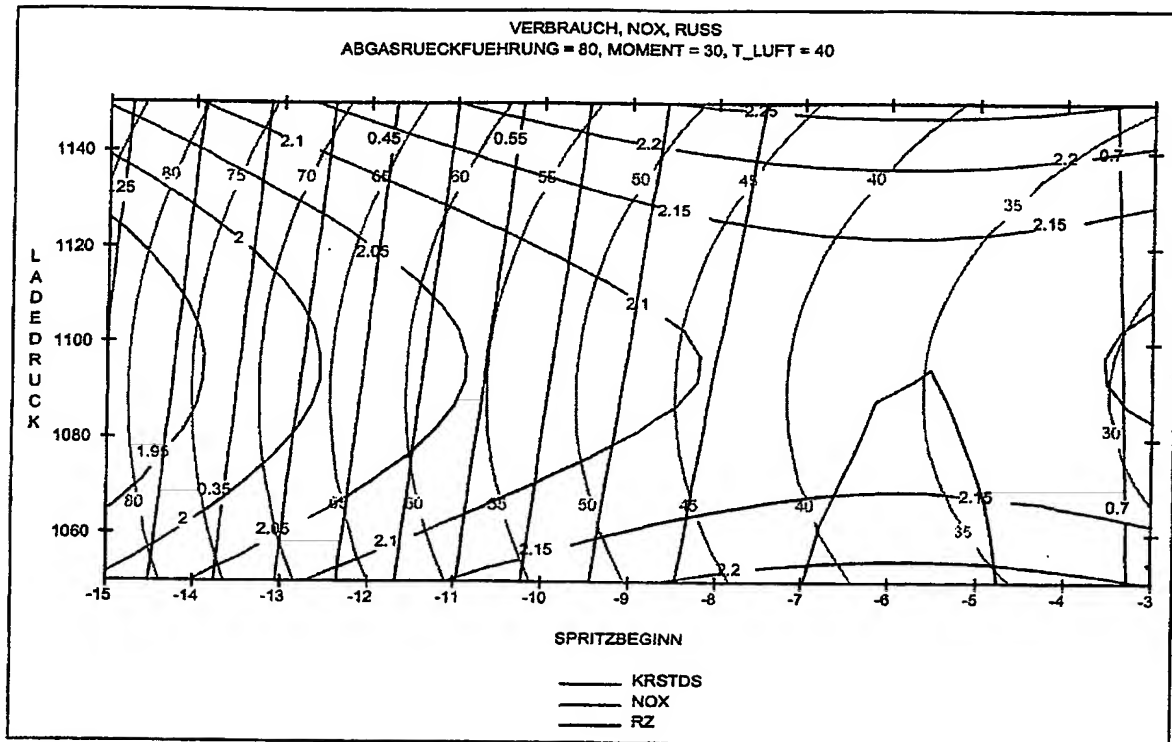


Abbildung 7: Kennfeld für den Kraftstoffdurchsatz KRSTDS, die Stickoxid- und die Rußemissionen NOx bzw. RUSSZ in Abhängigkeit vom Ladedruck PL in mbar und Einspritzbeginn SB in °KW bei Saugrohrlufttemperatur TL = 40 °C, Drehmoment MD = 30 Nm und Abgasrückführrate AGR = 80 %

Experimentell

kontrollierbare

Einflußfaktoren:

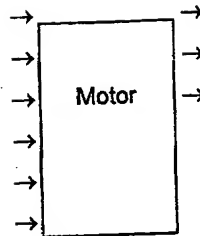
- Einspritzdüsenbauform DB
- Kraftstoffdruck FP
- Einspritzbeginn SB
- Abgasrückführrate AGR
-

Nicht

kontrollierbare

Einflußfaktoren:

- Lufttemperatur vor dem Einlaßventil TL
- Temperatur des Kühlwassers TW
-



Zielgrößen Z_i:

- Kraftstoffverbrauch KRSTDS
- Stickoxidemission NO_x
- Rußemission RUSSZ
- Kohlenwasserstoffemission KW
- Motorvibrationen VIB
-

Modellgleichung (quadratischer Polynom-Ansatz):

$$Z_i = a_{i0} + a_{i1} \cdot DB + a_{i2} \cdot FP + a_{i3} \cdot SB + \dots + a_{i11} \cdot DB^2 + a_{i22} \cdot FP^2 + a_{i33} \cdot SB^2 + \dots + a_{i12} \cdot DB \cdot FP + a_{i13} \cdot DB \cdot SB + \dots + a_{i23} \cdot FP \cdot SB + a_{i24} \cdot FP \cdot AGR + \dots + a_{i34} \cdot SB \cdot AGR + \dots$$

Jedes a_x erfordert mindestens einen Meßwert.

Abbildung 8: zusammenfassende schematische Darstellung des Prinzips der erfinderischen Lösung einer beschleunigten Kennfeldwert- bzw. Parameterwertermittlung.